Civil and Project Journal, 2024, 6(10), 47-68
https://doi.org/10.22034/cpj.2024.471104.1315

Civil and Project Journal
http://www.cpjournals.com/

Research Article

The Study of Geotechnical Hazards and Implementation Challenges of Dalukosh Tunnel (Project of Main Road of Aliguodarz-Masjed Soliman)

Vahid Joudaki[1]*, Majid Derikvandi[2], Mehran Mirzaei[3], Mohammadreza Farzinpour[3], Shilan Hoseyni[3]

[*]1- MSc, Tunnel Supervisor, Project of the Main Road of Aliguodarz-Masjed Soliman, Rahyab Melal Consulting Engineers Company
2- MSc, Head Supervisor, Project of the Main Road of Aliguodarz-Masjed Soliman, Rahyab Melal Consulting Engineers Company
3- MSc, Department of Geotechnics-Studies and Design of the Central Office, Rahyab Melal Consulting Engineers Company

Received: 01 July 2024; Revised: 7 August 2024; Accepted: 11 August 2024; Published: 11 August 2024

Abstract:

Tunnel number two (Dalukosh) is one of the important structures and among the many tunnels of the main road of Aligudarz-Masjed Soliman in the first part of this national project. In addition to the communication corridor for the southwest of the country to the country's capital, this project can provide access to the construction site of the dam and the large power plant of Lirok (whose studies are in progress). In addition to these cases, the route of this plan is located in the likely oil-rich areas of Iran. Therefore, this project can be very important for the exploration of oil reserves in these areas and for national interests. The geological location of the project is located in the structural zone of Zagros. Numerous tectonic activities have created a multitude of fault zones and the complexity of geological structures (bedding and folds) in this area. The geological conditions of this area made the implementation of the Dalukosh short tunnel (133 meters long) associated with risks and delays. In this article, the dangers and implementation problems of this tunnel are discussed. Knowing the risks and how to adopt remedial solutions in tunnel excavation operations can greatly reduce the risk of safety issues, costs and time delays. In the Dalukosh tunnel, the instability of the rock mass in the entrance-exit portals of the tunnel as well as the collapse in the crushed zones of the excavation path have caused risks. In this tunnel, in order to deal with geotechnical hazards, a series of solutions including the implementation of special reinforcements and the implementation of concrete retaining walls have been used.The purpose of presenting this article is to document the lessons learned and transfer the experiences of this project in the country's tunneling industry.

Keywords: *Lesson Learned, Tunneling, Geotechnical Hazards, Fault Zone, Zagros Zone.*

Cite this article as: joudaki,V. , Derikvandi,M. , Mirzaei,M. , Farzinpour,M. R. and Hoseyni,S. (2024). The Study of Geotechnical Hazards and Implementation Challenges of Dalukosh Tunnel (Project of Main Road of Aliguodarz-Masjed Soliman). (e202391). Civil and Project, 6(10), e202391. https://doi.org/10.22034/cpj.2024.471104.1315

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2024 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Corresponding author E-mail address: joudaki_vahid@yahoo.com*

نشریه عمران و پروژه، ۱۴۰۴، ۶ (۱۰)، ۶۸-۴۷
https://doi.org/10.22034/cpj.2024.471104.1315

نشریه عمران و پروژه
http://www.cpjournals.com/

بررسی مخاطرات ژئوتکنیکی و چالش‌های اجرایی تونل دالوکش (پروژه راه اصلی شهرستان الیگودرز- مسجد سلیمان)

وحید جودکی[1*]، مجید دریکوندی[2]، مهران میرزایی[3]، محمدرضا فرزین‌پور[3]، شیلان حسینی[3]

۱- کارشناسی ارشد، ناظر واحد تونل، پروژه راه اصلی الیگودرز- مسجد سلیمان، شرکت مهندسین مشاور راه‌یاب ملل
۲- کارشناسی ارشد، سر ناظر، پروژه راه اصلی الیگودرز- مسجد سلیمان، شرکت مهندسین مشاور راه‌یاب ملل
۳- کارشناسی ارشد، گروه ژئوتکنیک- مطالعات و طراحی دفتر مرکزی، شرکت مهندسین مشاور راه‌یاب ملل

تاریخ دریافت: ۱۱ تیر ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۷ مرداد ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۲۱ مرداد ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۲۱ مرداد ۱۴۰۳

چکیده:

تونل شماره دو (دالوکش)، یکی از سازه‌های مهم و از جمله تونل‌های متعدد راه اصلی الیگودرز- مسجد سلیمان در قطعه اول این پروژۀ ملی است. این پروژه می‌تواند علاوه بر کریدور ارتباطی برای جنوب غرب کشور به پایتخت کشور، امکان دسترسی به ساختگاه سد و نیروگاه عظیم لیروک (که مطالعات آن در دست اقدام است) را فراهم کند. مضاف بر این موارد، مسیر این طرح در مناطق محتمل نفت خیز ایران قرار دارد. لذا در آینده این پروژه می‌تواند برای اکتشافات ذخایر نفت در این مناطق و در جهت منافع ملی، حائز اهمیت فراوانی شود. ساختگاه زمین‌شناسی پروژه در زون ساختاری زاگرس قرار گرفته است. فعالیتهای متعدد تکتونیکی، موجب ایجاد انبوهی از زونهای گسلی و پیچیدگی ساختارهای زمین‌شناسی (لایه‌بندی‌ها و چین‌خوردگی‌ها) در این منطقه شده است. شرایط زمین‌شناسی این پهنه، عملیات اجرایی تونل کوتاه دالوکش (به طول ۱۳۳ متر) را با مخاطرات و تأخیراتی همراه ساخت. در این مقاله به شرح مخاطرات و مشکلات اجرایی این تونل پرداخته می‌شود. شناخت مخاطرات و چگونگی اتخاذ راهکارهای علاج‌بخشی در عملیات حفاری تونل‌ها میتواند ریسک مخاطرات ایمنی، هزینه‌ها و زمانبندی را تا حد زیادی تعدیل نماید. در تونل دالوکش نیز ناپایداری توده‌سنگ در پرتالهای ورودی- خروجی تونل و ریزش در زونهای خردشده مسیر حفاری، مخاطراتی را به دنبال داشته است. در این تونل در مواجهه با مخاطرات ژئوتکنیکی، مجموعه‌ای از راهکارها شامل اجرای تحکیمات ویژه، اجرای دیوارهای حائل بتنی جهت علاج بخشی مورد استفاده قرار گرفته است. هدف از ارائه این مقاله، مستندسازی درس آموخته‌ها و انتقال تجارب این پروژه در صنعت تونل‌سازی کشور است.

کلمات کلیدی:

درس آموخته، تونلسازی، مخاطرات ژئوتکنیکی، زون گسلی، زون ساختاری زاگرس

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: *joudaki_vahid@yahoo.com*

۱- مقدمه

در مناطق کوهستانی و صعب‌العبور، برای ایجاد راه ایمن و کم‌خطر، کاهش شیب دامنه‌ها و نزدیک شدن فاصله‌ها، از احداث تونل استفاده می‌شود. در دنیای رقابتی امروز، همراهی با دانش‌های روز و تجربه‌های افراد در گذشته، یکی از راهکارهای موفقیت پروژه‌ها و شرکت‌ها است. مدیریت و ثبت درس‌آموخته‌ها، سازمان‌های پروژه محور را قادر می‌سازد تا آنالیز بهتری از پروژه‌های خود بصورت سیستمی در اختیار داشته باشند و بدین‌سان ریسک اجرای پروژهای آتی خود را نیز کاهش دهند(Rostami et al, 2021).

در پروژه‌های تونلسازی؛ عوامل زمین‌شناسی، عوامل مدیریتی، عوامل فنی و ماشین آلات در وقوع حوادث موثرند. به دلیل شرایط پیچیده زمین‌شناسی، ارزیابی ریسک و اقدامات کنترلی جهت جلوگیری از حوادث، برای تضمین موفقیت پروژه‌های ساخت تونل ضروری است (Aghaie and Zolfegharifar, 2024).

تونلسازی یکی از ساخت و سازهای عمرانی پیچیده و پر خطر است که معمولاً با مشکلات زیادی مواجه می‌شود، زیرا محل ساخت تونل عمدتاً مناطق کوهستانی و صعب العبور است و الزامات سختگیرانه‌ای مربوط به فناوری ساخت و ساز دارد(Qu et al, 2022).

اجرای تونل‌ها نه تنها در روشهای ستنی، بلکه حتی به شیوه حفاری مکانیزه با ماشین‌های تمام مقطع (TBM) نیز گاهاً به دلیل مخاطرات زمین‌شناسی با توقفات مکرر و تأخیرات زمان‌بندی مواجه خواهد بود. در این میان می‌توان به تجارب مواجهه ماشین‌های حفار با مخاطرات زمین‌شناسی در تونلهای انتقال آب قمرود (Joudaki et al,2015,2017,2018.a,2020.a)، بازی‌دراز (Joudaki et al,2018.b,2019)، سرپل ذهاب (Joudaki et al, 2021)، کرمان و چمشیر (Joudaki et al,2020.b) در ایران اشاره کرد. گزارشات مختلفی نیز در خصوص مخاطرات حفاری تونلها در مناطق شهری (Mahdavi,2020. Ng et al.,2024. Noble,2024. Wagner,2024) ارائه شده است.

نتایج مطالعات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی به طور قابل توجهی بر طراحی و اجرای تونل تأثیرگذار است (Komolvilas et al, 2021). در زمان اجرای تونل، ساختارهای زمین‌شناسی باید از لحاظ فنی مورد مطالعه و نظارت قرار گیرند (Riella et al,2015). از آنجایی که مخاطرات ساخت تونل‌ها مرتبط با شرایط زمین‌شناسی آنها است؛ بنابر این بسیار مهم است که اطلاعات زمین‌شناسی در فرآیند اجرا به دست آید و در جهت تضمین ایمنی استفاده شود (Cao et al, 2022).

هنگامی که مسیر اجرای تونل از زمین‌های ریزشی و سایر شرایط نامساعد زمین‌شناسی عبور می‌کند؛ می‌بایست اقدامات فنی و مهندسی لازم برای مقابله با این مخاطرات انجام شود (Soldo et al, 2019). سیستم‌های نظارتی می‌توانند موجب بهبود وضعیت ایمنی و جلوگیری از وقوع حوادث خطرناک در زمان اجرای تونل‌ها شوند (Sihombing et al, 2021).

در این مقاله نیز به شرح مخاطرات اجرای یک تونل جاده‌ای در قطعه یک پروژه راه اصلی الیگودرز - مسجد سلیمان پرداخته می‌شود که به شیوه ستنی حفاری گردیده است. این طرح بین استان‌های خوزستان و لرستان (بین دو شهر مهم این دو استان یعنی الیگودرز و مسجد سلیمان)، در میان رشته کوه‌های زاگرس قرار گرفته است. وجود رشته کوه زاگرس و بالطبع آن، توپوگرافی کوهستانی و خشن منطقه، احداث راه در این مناطق را با صعوبت و دشواری‌های فراوانی مواجه کرده است که این مسئله طی سالیان متمادی مشکلات زیادی برای مردمان این مناطق به وجود آورده است. به دلیل شرایط کوهستانی، احداث راه اصلی در این مناطق، علاوه بر سازه‌های خاص متعدد (نظیر پل‌های بزرگ، دیوارهای حائل بتنی، آبرو و ...)، به ایجاد فضاهای زیرزمینی تونلی متعدد نیز نیاز دارد.

پروژه راه اصلی الیگودرز - مسجد سلیمان در صورت احداث می‌تواند به عنوان کریدور ارتباطی برای جنوب غرب کشور به مرکز و پایتخت کشور عمل کند. همچنین این جاده می‌تواند در آینده امکان دسترسی به ساختگاه سد و نیروگاه بزرگ لیروک

(که مطلعات آن در دست اقدام است) را نیز فراهم کند. مضاف بر این موارد، مسیر این جاده در مناطق محتمل نفت خیز ایران قرار دارد. لذا این پروژه در صورت احداث، می‌تواند در آینده برای استخراج ذخایر نفت از این مناطق و در جهت منافع ملی، حائز اهمیت فراوانی شود.

از سوی دیگر، با توجه به قرارگیری صنایع نفتی و پالایشگاه‌های ایران در استان خوزستان (که شریان حیاتی اقتصاد ایران محسوب می‌شوند)، توسعه و افزایش راه‌های ارتباطی این استان (از طریق احداث راه اصلی الیگودرز به مسجد سلیمان) می‌تواند موجب تقویت پدافند غیرعامل کشور و کاهش آسیب‌پذیری این زیرساختهای اقتصادی در مقابل تهدیدها و اقدامات نظامی کشورهای متخاصم گردد.

این طرح در قطعه یک (محور بزنوید-دستگرد) دارای ۳ دستگاه تونل و در قطعه دو (محور دستگرد- لیروک) داری ۱۲ دستگاه تونل می‌باشد. کوهستانی بودن منطقه و تعدد تونل‌ها در مسیر این پروژه، ظرفیت‌های منحصر به فردی را در بحث پدافند غیر عامل برای راه اصلی الیگودرز- مسجد سلیمان، ایجاد خواهد نمود.

از این نظر تونل دالوکش و دیگر تونل‌های این طرح، سازه‌های بسیار مهمی هستند که در آینده علاوه بر نقش حمل و نقل، پتانسیل کاربری‌های دیگر در مواقع ضروری را خواهند داشت. با توجه به اهمیت این تونل‌ها، در این مقاله مشکلات اجرایی و مخاطرات ژئوتکنیکی در زمان احداث یکی از این سازه‌های زیرزمینی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

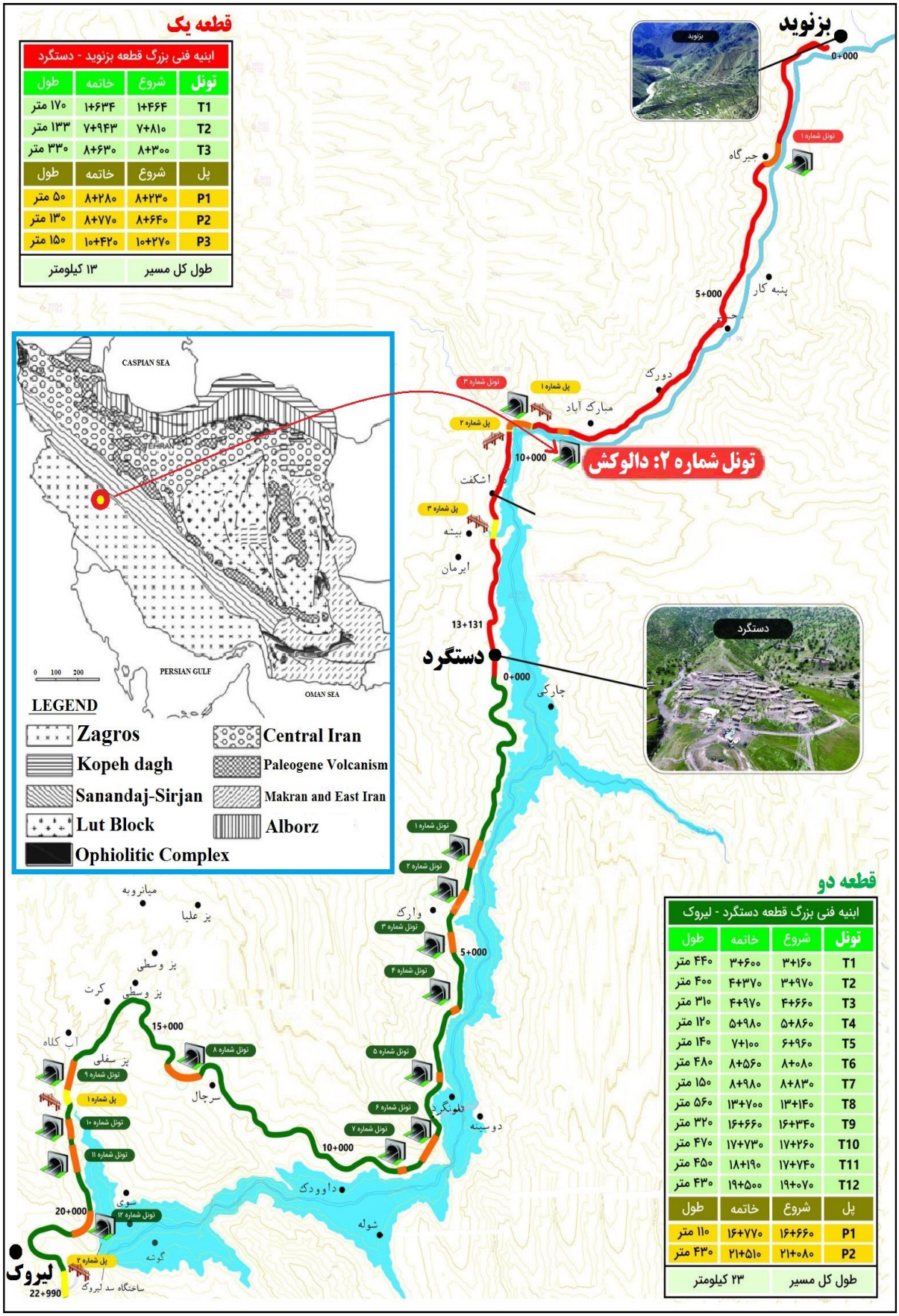
۲- روش شناسی

در این مقاله بر اساس نتایج طراحی‌ها و بازدیدهای میدانی در زمان اجرای تونل دالوکش، مخاطرات ژئوتکنیکی و چالش‌های اجرایی این سازه مورد بررسی قرار گرفته است. اطلاعات این مقاله به شیوه قضاوت‌های مهندسی، مستندسازی گزارشات و تهیه یادداشت‌های فنی حین اجرای سازه مذکور گردآوری شده است.

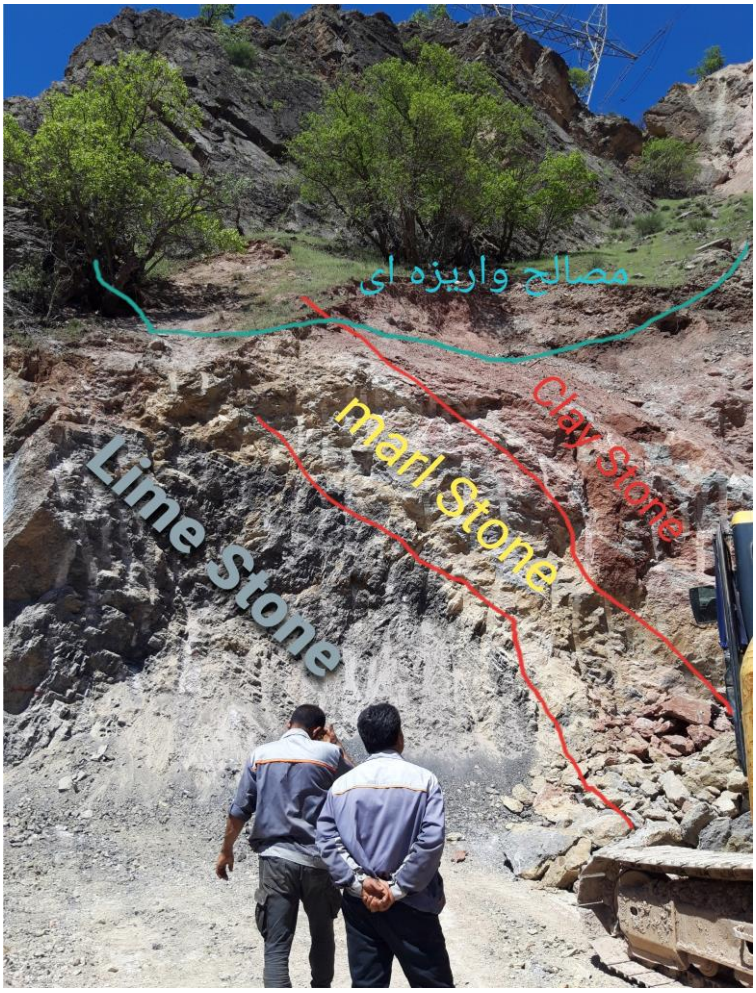
این سازه جزئی از مسیر احداثی قطعه یک پروژه راه اصلی الیگودرز - مسجد سلیمان (محور بزنوید به دستگرد) است که به دلیل وجود توپوگرافی کوهستانی منطقه، از تونل، پل و ترانشه‌های با ارتفاع زیادی عبور کرده است. قطعه یک دارای ۳ دستگاه تونل می‌باشد که در این مقاله به ارائه تجربیات و ذکر درس‌آموخته‌ها در هنگام اجرای تونل شماره ۲، این محور پرداخته می‌شود. این تونل کوتاه (به طول ۱۳۳ متر) در حد فاصل کیلومتراژ ۷+۸۱۰ الی ۷+۹۴۳ پروژه مذکور قرار دارد.

منطقه مورد مطالعه (تونل دالوکش) بر اساس تقسیم‌بندی کلی زمین‌شناسی ایران (Aganabati, 2005)، در زون ساختاری زاگرس، قرار گرفته است (شکل ۱). فعالیت‌های متعدد تکتونیکی، موجب ایجاد انبوهی از زونهای گسلی و پیچیدگی ساختارهای زمین‌شناسی (لایه‌بندی‌ها و چین‌خوردگی‌ها) در این منطقه شده است. شرایط زمین‌شناسی این پهنه، عملیات اجرایی تونل کوتاه دالوکش (به طول ۱۳۳ متر) را با مخاطرات ژئوتکنیکی و تأخیراتی همراه ساخته است. لیتولوژی تشکیلات در مسیر حفاری تونل شامل تناوبی از سنگ‌های آهکی با میان لایه‌های مارنی- رسی و نیز مصالح واریزه‌ای (در ترازهای بالایی محور تونل) می‌باشد (شکل ۲).

عملیات اجرایی این تونل با خاکبرداری جهت آماده سازی پرتال ورودی از اواخر بهمن ماه ۱۴۰۱ آغاز شد و حفاری آن در اواخر تیر ماه ۱۴۰۳ پایان یافت. در این مقاله به مخاطرات ژئوتکنیکی و چالش‌های عملیات حفاری این تونل کوتاه (به طول ۱۳۳ متر) پرداخته می‌شود.



شکل ۱- موقعیت زمین‌شناسی و جغرافیایی (Stocklin, 1968, 1977) تونل‌ها و دیگر سازه‌های راه اصلی الیگودرز- مسجد سلیمان



شکل ۲- نمایی از تنوع لیتولوژیکی مسیر حفاری تونل دالوکش (جبهه کار پرتال ورودی قبل از اجرای گالری).

۳- ارائه و تحلیل مطالعات میدانی و نتایج

۳-۱- برآورد پارامترهای ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی تشکیلات مسیر حفاری

با توجه به صعب العبور بودن منطقه در پروژه راه اصلی الیگودرز- مسجد سلیمان، انجام مطالعات ژئوتکنیکی و حفاری گمانه‌های اکتشافی بر روی محور تونل دالوکش، با موانع و محدودیت‌های فراوان اجرایی مواجه بود.

لذا در این پژوهش با استفاده از خصوصیات مقاومتی ماده سنگ و برداشت‌های زمین‌شناسی، به تعیین پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ‌های تونل دالوکش پرداخته شده است. به این منظور از نرم افزار ROCLAB برای تحلیل اطلاعات مذکور استفاده شده است (شکل ۳).

نرم‌افزار ROCLAB به منظور استفاده از معیار شکست هوک- براون (Hoek and Brown, 1980,1988. Hoek et al, 2002) ارائه شده است و به کاربر اجازه می‌دهد تا تخمین مناسبی از خصوصیات مهندسی توده‌سنگ را به دست آورد. از نتایج این نرم‌افزار می‌توان به عنوان ورودی‌های مناسب در بسیاری از نرم‌افزارهای تحلیل عددی استفاده کرد و داده‌های حاصل را در طراحی‌های مهندسی مورد بهره برداری قرار داد.

داده‌های ورودی این نرم‌افزار شامل مقاومت فشاری تک محوره، اندیس مقاومت زمین‌شناسی، پارامتر مربوط به سنگ سالم (mi) و فاکتور اغتشاش می‌باشد. معیار شکست هوک-براون فقط در سنگ‌های بکر یا در توده‌سنگ‌های شدیداً درزه‌دار (مشابه

با وضعیت تشکیلات زمین‌شناسی تونل دالوکش) که می‌توان آنها را همگن و ایزوتروپ فرض کرد، قابل استفاده است. این مدل را نمی‌توان برای سنگ‌های داری شیستوزیته (مانند سنگهای شیست و اسیلت) یا توده‌سنگ‌هایی که خواص سنگ در آنها به وسیله یک سری ناپیوستگی‌هایی مانند صفحات لایه‌بندی کنترل می‌گردد، مورد استفاده قرار گیرد.

البته وقتی دو سری ناپیوستگی در توده‌سنگی وجود دارد نیز از معیار شکست هوک- براون می‌توان با احتیاط زیاد استفاده کرد؛ با این شرط که هیچ کدام از این دو سری ناپیوستگی اثر غالبی بر رفتار توده سنگ نداشته باشد.

نتایج حاصل از نرم افزار ROCLAB و برآورد خصوصیات مقاومتی تشکیلات زمین‌شناسی تونل دالکوش، در شکل ۳ به شرح زیر می‌باشند:

C = چسبندگی توده سنگ

GSI = شاخص مقاومت زمین شناسی

σ_C = مقاومت تک محوره سنگ سالم

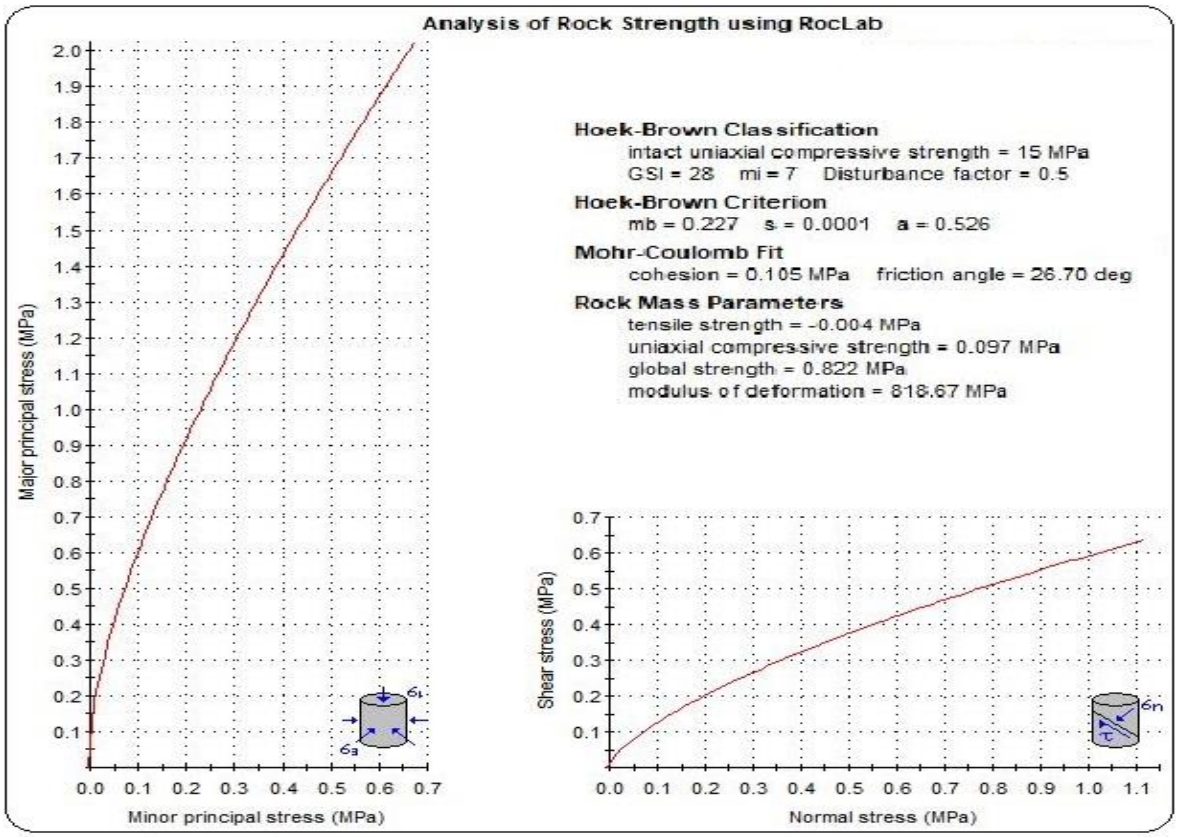
σ_{Cm} = مقاومت تک محوره توده سنگ

φ = زاویه اصطکاک توده سنگ

E = مدول تغییر شکل پذیری

σ_T = مقاومت کششی توده سنگ

a, s, m_b = پارامترهای هوک- براون.



شکل ۳- برآورد پارامترهای مقاومتی توده سنگ تونل دالوکش با استفاده از نرم افزار ROCLAB

۳-۲- مخاطرات اجرایی در ورودی تونل

پیش از آغاز عملیات اجرایی، رخنمون تشکیلات سنگی در جاده روستایی مجاور تونل، خرد شدگی شدید توده‌سنگها و صعوبت حفاری در محیط تونل را گواهی می‌داد (شکل ۴). از این نظر طولانی‌شدن و افزایش زمان‌بندی عملیات اجرای تونل قابل پیش‌بینی بود. اجرای گالری ورودی تونل تمهیدات و مقدماتی نیاز داشت. لذا در موقعیت گالری در سمت چپ محور ابتدا یک فونداسیون بتنی اجرا گردید. سپس بر روی فونداسیون سمت چپ محور و بر روی بستر سنگی سمت راست محور نیز دو دیوار بتنی برای استقرار قابهای گالری اجرا گردید (شکل ۵). سرانجام پس از اتمام عملیات اجرای گالری ورودی، اولین پاس آتشکاری جبهه کار تونل صورت گرفت.

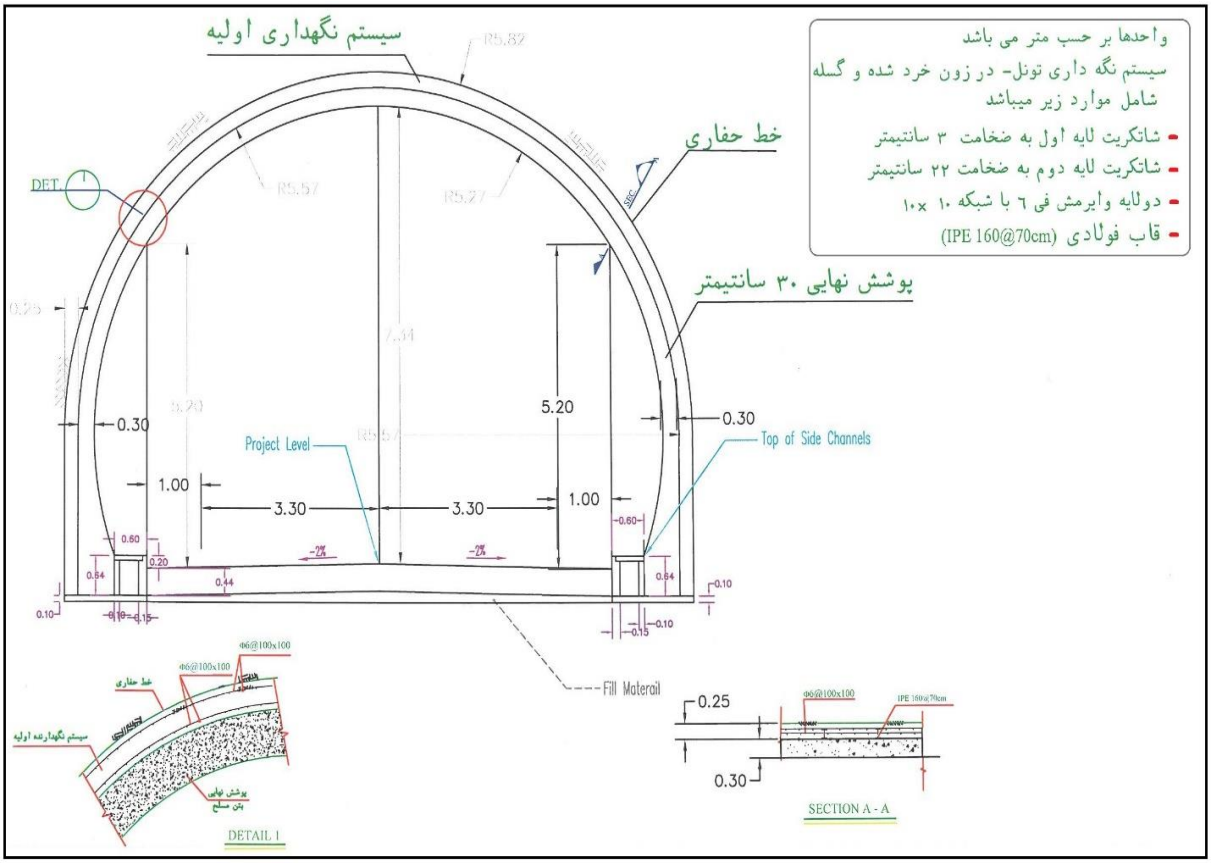
شیب لایه‌بندی‌ها و ضعف‌های ساختاری توده‌سنگ، در هنگام آتشکاری موجب لغزش و ریزش توده سنگ در دو موقعیت شد. ریزشها موجب تخریب بخشی از گالری ورودی تونل شد (شکل ۶). در متراژهای ابتدایی، جهت‌یابی لایه‌بندی توده‌سنگ‌ها به موازات محور تونل بود. شیب لایه‌ها نیز در خلاف جهت پیشروی تونل و در حدود ۴۰ درجه بوده است. شیب لایه‌ها و نیز وجود میان لایه‌های مارنی در میان لایه‌های آهکی، پتانسیل توده سنگ برای لغزش را تشدید می‌نمود.

پس از چند گام پیشروی، عملاً هیچگونه لایه‌بندی در تشکیلات زمین‌شناسی وجود نداشت و عمده مسیر حفاری در زون‌های خرد شدهٔ ریزشی قرار گرفت. پایین بودن مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگهای مسیر حفاری و ریزشی بودن مصالح، موجب شد تا پیشروی با حداکثر تمهیدات انجام گیرد و در کل مسیر نیز جهت انجام تحکیمات اولیه از قابگذاری با فواصل ۰٫۵ تا ۱ متر استفاده شود (شکل ۷).

شکل ۴- نمایی از خرد شدگی تشکیلات مسیر تونل دالوکش (رخنمون سنگها در محدوده مجاور جاده روستایی).

شکل ۵- نمایی از اجرای فونداسیون و دیوار بتنی جهت اجرای گالری ورودی تونل دالوکش.

شکل ۶- نمایی از ریزش‌های رخ داده بر روی گالری ورودی تونل دالوکش.



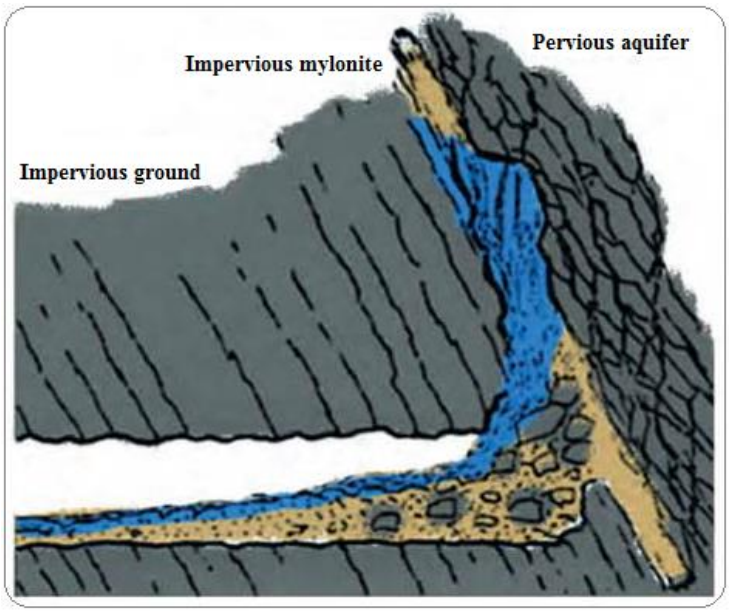
شکل ۷- نقشه اجرایی سیستم تحکیمات و نگهداری اولیه تونل دالوکش.

در این تونل تنها در متراژهای ابتدایی از روش چالزنی (با استفاده از ماشین جامبو دریل) و آتشکاری برای حفاری استفاده شد. در ادامه با توجه به ریزشی بودن تشکیلات زمین‌شناسی و سطح پایین امتیازات مهندسی توده‌سنگ (شاخص RMR کمتر از ۳۰) در طبقه‌بندی ژئومکانیکی بنیاوسکی (Bieniawski, 1976, 1989)، باقی‌ماندهٔ مسیر با پیکورکاری توسط بیل مکانیکی حفاری شد (شکل ۸).

با توجه به قرارگیری توده سنگ تونل در زونهای خردشده و نیز با توجه به اینکه در ارتفاعات نیز مصالح واریزه‌ای کوهستان بر روی محور تونل انباشته شده بود؛ وقوع هرگونه ناپایداری در جبهه‌کار تونل می‌توانست منجر به ریزش حجم بالایی از آوار سنگی و انتقال مصالح واریزه‌ای روباره تونل به تراز حفاری گردد. با توجه به شرایط جوی منطقه چنین حادثه‌ای در فصول بارندگی می‌توانست موجب انتقال جریانهای آب سطحی (ناشی از بارندگی‌های شدید) به تراز حفاری تونل و تشدید ریزش‌ها گردد (شکل ۹). لذا می‌بایست پیشروی و اجرای تحکیمات با حداکثر تمهیدات ایمنی انجام می‌گرفت.

علی‌رغم تمهیدات و احتیاطاتی که در روند پیشروی صورت می‌گرفت؛ در حد فاصل کیلومتراژ ۷+۸۵۵ الی ۷+۹۲۰ در دو موقعیت (با شاخص RMR کمتر از ۲۰)، ریزش رخ داد. جهت جلوگیری از توسعه ریزش در این موقعیتها، فضای خالی ناشی از ریزش، به سرعت و در کمترین زمان ممکن با جاگذاری یونولیت (همراه با شاتکریت) و پوکه معدنی (همراه با تزریق دوغاب سیمان) تحکیم گردید (شکل ۱۰).

شکل ۸- نمایی از وضعیت خردشدگی توده سنگ و روش حفاری در جبهه کار تونل دالوکش.

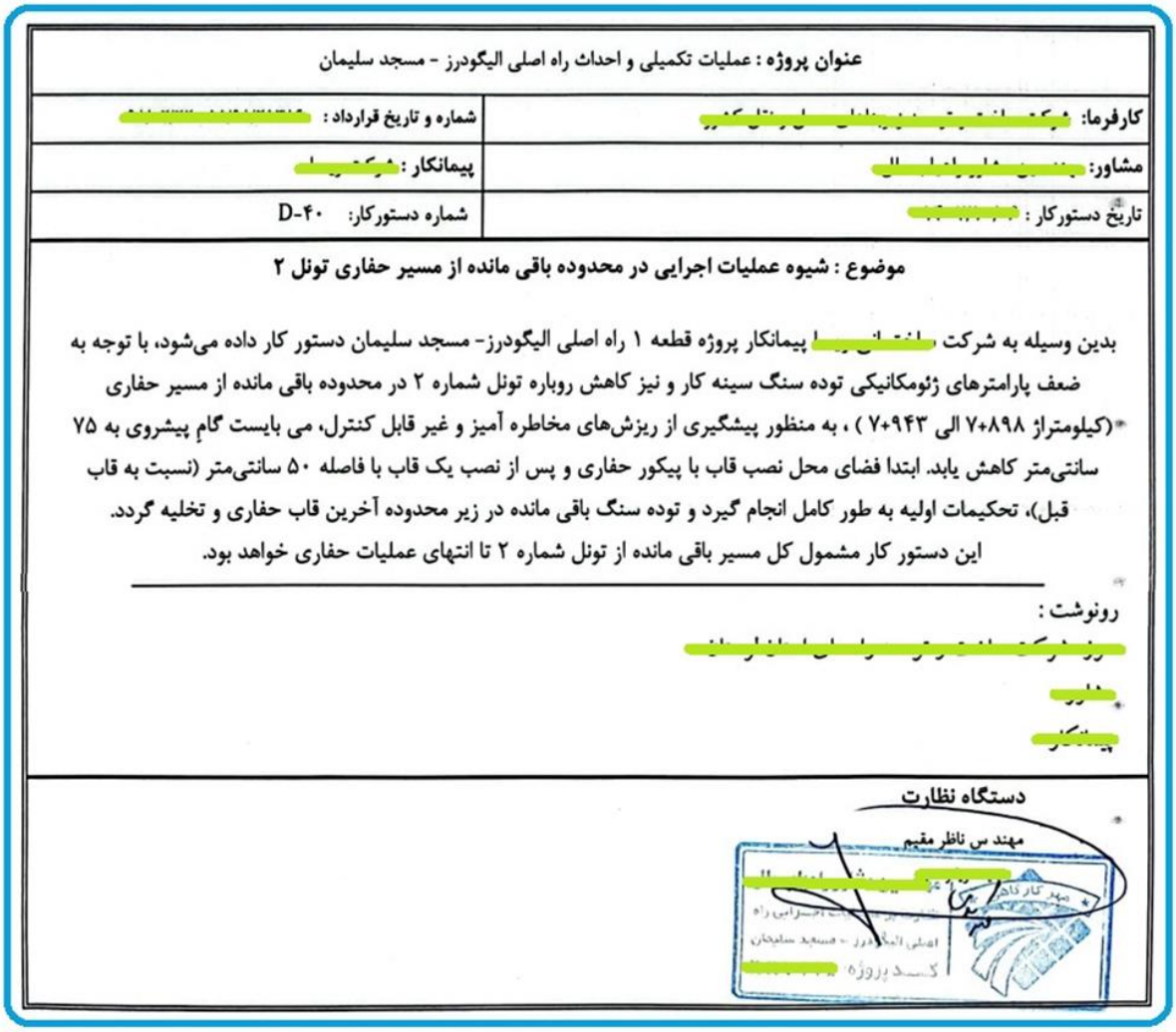


شکل ۹- تصویری شماتیک از شرایط زونهای خرد شده- ریزش مصالح سنگی به همراه جریان آب در جبهه کار تونل (Panet, 2023).

شکل ۱۰- الف: نما از زیر قابگذاری. ب: نمای فضای خالی بالای قابگذاری. حفره ایجاد شده در سقف تونل دالوکش ناشی از ریزش توده‌سنگ در کیلومتراژ ۷+۸۵۵ (حجم ریزش: در حدود ۴۰ متر مکعب).

در این تونل شیوه‌های مختلف عملیات اجرایی (به ویژه در بحث میزان طول گام حفاری، نحوه اجرای تحکیمات، فواصل قابگذاری)، متناسب با برآورد تغییرات پارامترهای ژئومکانیکی (نتایج حاصل از طبقه‌بندی مهندسی سنگ در بازدیدهای مشترک زمین‌شناسان واحد نظارت و پیمانکار) اتخاذ می‌گردید، به نحوی که از وقوع مخاطرات تا حد امکان جلوگیری به عمل آید.

با توجه به حساسیت های ایمنی در تونل، کنترل‌های روزانه به طور مستمر توسط عوامل دستگاه نظارت صورت گرفت. همچنین در این راستا جهت جلوگیری از رخداد ریزش‌های غیر قابل کنترل و بروز خطرات ایمنی، دستگاه نظارت در قالب نامه‌نگاری و دستور کار، به طور مستمر موارد ضروری را به پیمانکار پروژه ابلاغ نمود (شکل ۱۱).



عنوان پروژه : عملیات تکمیلی و احداث راه اصلی الیگودرز - مسجد سلیمان

کارفرما: [redacted] | شماره و تاریخ قرارداد : [redacted]

مشاور: [redacted] | پیمانکار : [redacted]

تاریخ دستورکار : [redacted] | شماره دستورکار: D-۴۰

موضوع : شیوه عملیات اجرایی در محدوده باقی مانده از مسیر حفاری تونل ۲

بدین وسیله به شرکت [redacted] پیمانکار پروژه قطعه ۱ راه اصلی الیگودرز- مسجد سلیمان دستور کار داده می‌شود، با توجه به ضعف پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ سینه کار و نیز کاهش روباره تونل شماره ۲ در محدوده باقی مانده از مسیر حفاری (کیلومتراژ ۷+۸۹۸ الی ۷+۹۴۳) ، به منظور پیشگیری از ریزش‌های مخاطره آمیز و غیر قابل کنترل، می بایست گام پیشروی به ۷۵ سانتی‌متر کاهش یابد. ابتدا فضای محل نصب قاب با پیکور حفاری و پس از نصب یک قاب با فاصله ۵۰ سانتی‌متر (نسبت به قاب قبل)، تحکیمات اولیه به طور کامل انجام گیرد و توده سنگ باقی مانده در زیر محدوده آخرین قاب حفاری و تخلیه گردد.

این دستور کار مشمول کل مسیر باقی مانده از تونل شماره ۲ تا انتهای عملیات حفاری خواهد بود.

رونوشت :

[redacted]

دستگاه نظارت

مهندس ناظر مقیم

[redacted]

شکل ۱۱- یک نمونه از دستور کارهای ابلاغی به پیمانکار جهت پیشگیری از ریزش‌های مخاطره آمیز در تونل دالوکش.

۳-۳- مخاطرات اجرایی در خروجی تونل

از دیگر مواردی که عملیات حفاری تونل در گامهای پایانی را با چالش مواجه کرده بود، شرایط خاص توده‌سنگ در محدوده پرتال خروجی تونل بود. عوامل تأثیرگذار بر مخاطرات احتمالی پرتال خروجی تونل در این قسمت ارائه شده است:

• ضخامت اندک دیواره سنگی جناح سمت چپ تونل در ده متر انتهایی: عدم مقاومت دیواره سنگی جناح سمت چپ تونل در برابر تنش‌ها (وزن طبقات بالایی تشکیلات زمین‌شناسی) و ناپایداری آن در ده متر انتهایی می‌توانست در زمان حفاری گام‌های انتهایی، توده‌سنگ خروجی تونل را مستعد ریزش به سمت چپ (در سراشیبی درۀ مجاور تونل منتهی به بستر رودخانه بختیاری) نماید.

• عقب‌تر بودن دیواره سنگی جناح سمت چپ تونل نسبت به دیواره سنگی سمت راست: اختلاف فاصلۀ انتهای دیواره سنگی جناح سمت چپ تونل (در موقعیت کیلومتراژ ۷+۹۴۰) نسبت به انتهای دیواره سنگی سمت راست (در موقعیت کیلومتراژ ۷+۹۴۷) در راستای خط پروژه حدود ۷ متر است. این عامل علاوه بر اینکه احتمال ریزش و رانش توده‌های سنگی به سمت درۀ مجاور را تشدید میکرد؛ موجب صعوبت قابگذاری و اجرای تحکیمات گالری نیز شده است. چون در این وضعیت، قابگذاری به صورت عمود بر محور پروژه انجام نمی‌گیرد و می‌بایست قاب‌های گالری به صورت غیر عمود نسبت به محور پروژه نصب گردند. چنین وضعیتی نیازمند محاسبات دقیق هندسی در طراحی و اجرای گالری است.

• درزه داری‌های سنگ در هر دو جناح راست و چپ سینه‌کار خروجی: این درزه و شکاف‌ها در هر دو جناح منطبق بر موقعیت طرفین قاب‌های گالری خروجی تونل هستند (تصویر ۱۲). این وضعیت بیشترین سطح تنش را به پایهٔ قاب‌ها (که نقش اصلی باربری و کنترل تنشها در سازه گالری را ایفا می‌کنند) وارد می‌کند.

• قرار گیری توده آهک مارنی ضعیف در زیر طبقات آهکی: مقطع بالای سینه‌کار خروجی تونل از توده‌سنگ آهکی درزه‌دار تشکیل شده است و در زیر این تشکیلات نیز آهک مارنی قرار گرفته است. این سنگ مارنی اگرچه درزه داری کمتری نسبت به سنگ آهکی بالایی دارد اما که به لحاظ مقاومت ماده سنگ، پارامترهای ژئومکانیکی بسیار ضعیف‌تری دارد و توان باربری طبقات آهکی بالایی خود را ندارد. بدون اجرای گالری و تحکیمات اصولی، محتمل بود که این توده مارنی در آخرین گامهای حفاری، به طور ناگهانی یکپارچگی خود را از دست بدهد و شرایط برای سقوط طبقات بالایی فراهم شود (تصویر ۱۲).

• روباره اندک تونل در سینه‌کار پرتال خروجی: روباره کمتر از ۱۰ متر که در کنار فاکتورهای بالا بر احتمال رخداد مخاطرات و ریسک انجام کار می‌افزود (تصویر ۱۲).

شکل ۱۲- وضعیت لیتولوژی و درزه داری سنگ در سینه کار خروجی تونل دالوکش (توده ضعیف مارنی در زیر توده آهکی).

• وجود دکل برق فشار قوی در تراز بالایی روی محور تونل: این عامل از امکان اجرای آتشکاری و سبک سازی توده‌سنگ در خروجی تونل جلوگیری کرد. لازم به توضیح است به منظور عملیات آتشباری و سبک سازی توده سنگ با استقرار دستگاه راسول بر روی محور تونل چند ردیف چالزنی بر روی توده سنگ خروجی تونل اجرا شد. اما در آخرین لحظات، با اعلام نظر واحد نظارت مقیم، تیم اجرایی از خرج‌گذاری و انفجار منصرف شدند. این اقدام می‌توانست مخاطرات پیش‌بینی نشده‌ای را برای خط انتقال برق سراسری کشور به دنبال داشته باشد (تصویر ۱۳).

• آبراهه و جریان بارندگی های فصلی در جناح سمت راست: این عامل نیز موجب آب شُستگی و تضعیف پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ در بخشی از محدوده سمت راست شده بود (تصویر ۱۳).

برای حل مشکل ناپایداری احتمالی توده سنگ، پیش از آغاز عملیات اجرایی تونل (در بهمن ۱۴۰۱)، گزینه جابجایی مقطع خروجی تونل به سمت راست محور، مورد بررسی و امکان سنجی قرار گرفت. اما وجود دکل برق و آبراهه در محدوده سمت راست محور، مانع از اجرای طرح مذکور شد.

شکل ۱۳- وقعیت دکل برق و مسیر آبراهه در خروجی تونل دالوکش.

از طرفی با شروع عملیات اجرای گالری و تحکیمات توده‌سنگ، برای عبور و مرور اهالی بومی منطقه از جاده مجاور پرتال خروجی، مانع ایجاد می‌شد. جاده روستایی مذکور، عرض کمی داشت و در مجاورت درۀ پر شیب و خطرناک (منتهی به رودخانه بختیاری) قرار داشت. از این جهت پیش از هر اقدامی ابتدا می‌بایست برای جابجایی مسیر جاده روستایی به سمت چپ محور و ایمن‌سازی محل تردد اهالی بومی، اقدامات لازم صورت می‌گرفت.

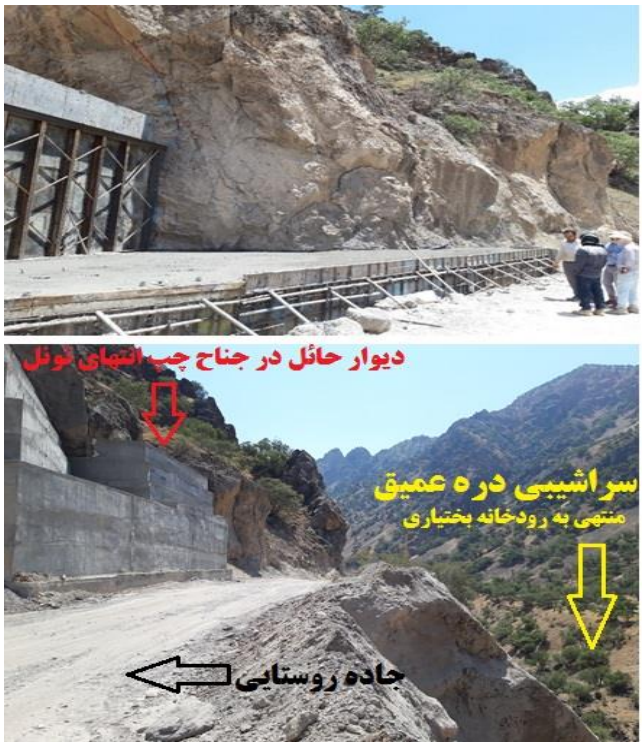
در این راستا ابتدا یک دیوار حائل بتنی در جهت چپ محور (سمت درۀ منتهی به رودخانه بختیاری) اجرا گردید و با این تمهید، جاده روستایی به محدوده‌ای دورتر از مکان اجرای گالری انتقال داده شد. قالب بندی و اجرای دیوار در سراشیبی درۀ مشرف به رودخانه نیز با دشواری و صعوبت فراوانی همراه بود (شکل ۱۴).

شکل ۱۴- اجرای دیوار حائل جهت تعریض و جابجایی جاده روستایی به موقعیت خارج از محدوده گالری خروجی تونل دالوکش.

اجرای فونداسیون و دیوار برای ایجاد گالری هم موانع خاص خود را داشت. قرارگیری خط انتقال لوله آب آشامیدنی روستاهای مسیر در فونداسیون گالری و ترکیدگی آن حین خاکبرداری، تأخیرات و حساسیت‌هایی را به دنبال داشت.

از طرفی با توجه به ضخامت کم دیواره سنگی سمت چپ تونل در ده متر انتهایی، یک دیوار حائل بتنی دیگر به موازات خط پروژه در ده متر انتهایی تونل اجرا گردید، تا از ناپایداری و حرکت توده‌سنگ در گامهای پایانی جلوگیری گردد. اجرای این دیوار ضرورتی اجتناب ناپذیر بود؛ چون توده‌سنگ در جناح سمت چپ تونل علاوه بر نداشتن ضخامت کافی، در ترازهای بالایی درزه‌دار و دارای چند گوهٔ سنگی نیز بود. در این محدوده دیواره جناح چپ تونل تنها به اندازهٔ عرض جادهٔ روستایی مجاور با دره‌ای عمیق و پر شیب (منتهی به رودخانه بختیاری) فاصله داشت (شکل ۱۵). لذا در صورت عدم تحکیم توده‌سنگ دیواره جناح چپ تونل در متراژهای پایانی حفاری، احتمال ریزش و رانش حجم بالایی از تشکیلات زمین‌شناسی به سمت سراشیبی دره وجود داشت. در صورت وقوع چنین اتفاقی، عملیات اجرایی تونل با مجموعه‌ای از چالش‌های پیچیده مواجه می‌شد. تأخیرات طولانی‌مدت عملیات اجرایی، خسارات سنگین مالی، مخاطرات جانی برای پرسنل اجرایی داخل تونل (و البته برای اهالی بومی منطقه در زمان تردد از جاده روستایی مجاور)، مسدود شدن راه ارتباطی روستاهای مسیر (و حساسیتهای اجتماعی ناشی از آن) تنها بخشی از تبعات چنین اتفاقی می‌توانست باشد.

پس از اجرای دیوار بتنی در سمت چپ محور تونل (شکل ۱۵) و اجرای فونداسیون و دیوارهای گالری خروجی تونل (شکل ۱۶)، فضای بین دیوارهای گالری با مصالح خاکی پُر گردید، تا بیل مکانیکی بر روی سکوی خاکی مستقر گردد و سطح سینه‌کار خروجی تونل با پیکورکاری، جهت نصب اولین قاب گالری، هموار و آماده گردد.



شکل ۱۵- نمایی از مراحل اجرای دیوار بتنی به موازات خط پروژه در ده متر انتهایی تونل دالوکش (به موازات جناح چپ تونل).

شکل ۱۶-مراحل اجرای فونداسیون و دیوارهای بتنی گالری خروجی تونل.

البته با توجه به اینکه دیواره سمت چپ نسبت به دیواره سمت راست خروجی سینه‌کار تونل، ۷ متر عقب‌تر می‌باشد و امکان اجرای قابگذاری عمود بر محور وجود نداشت. لذا می‌بایست قابگذاری با زاویه نسبت به محور عمود انجام می‌گرفت که این امر موجب افزایش طول نورد قاب‌ها و مشکلات حین نصب آنها می‌شد.

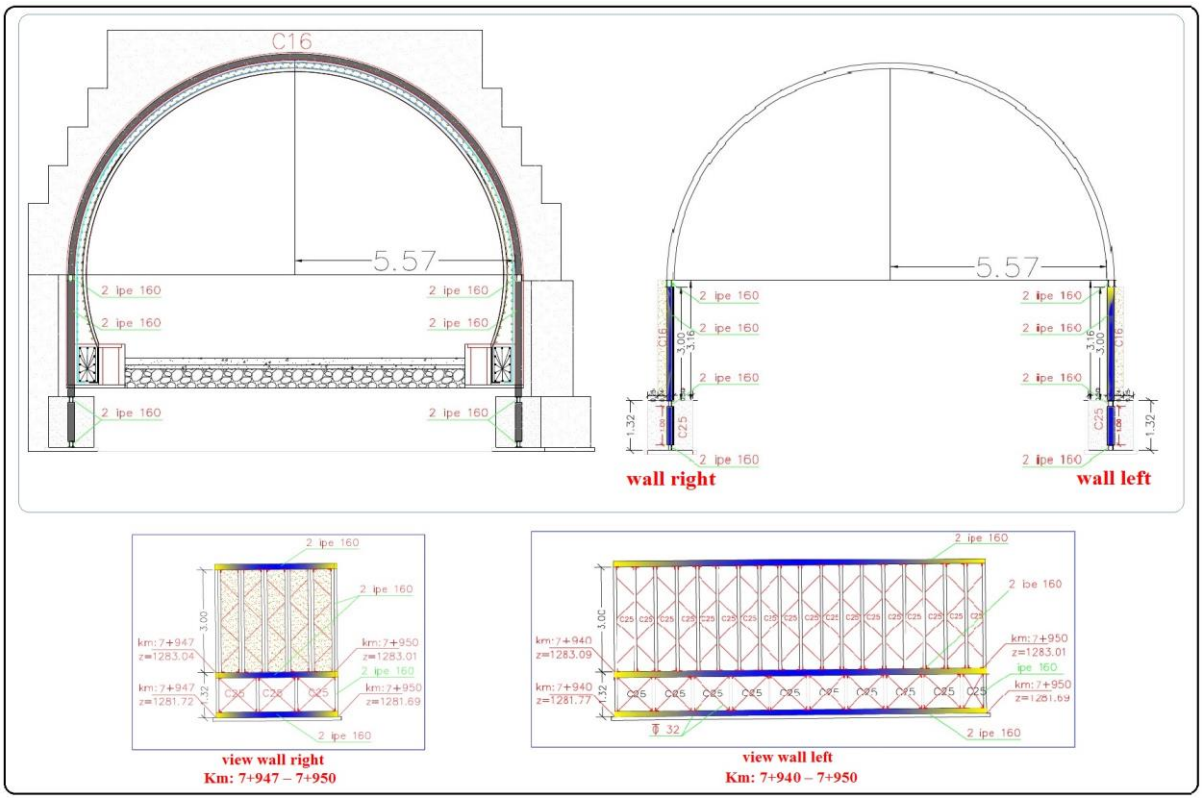
لذا با انجام محاسبات هندسی و نقشه‌برداری نسبت به برآورد طول قاب‌ها و جانمایی محل دقیق هر قاب اقدام گردید. شیوه جانمایی به نحوی بود که قابها در جناح راست محور با فواصل بسیار اندک (کمتر از ۱۰ سانتی متر) و در جناح چپ با فاصله زیاد (یک متر) نصب گردیدند (شکل ۱۷).

شکل ۱۷- نصب قاب‌های گالری خروجی تونل دالوکش.در جناح راست فواصل کمتر از ۱۰ سانتی متر. در جناح چپ فواصل یک متری.

پس از نصب قاب‌ها و اجرای تحکیمات گالری، دیوارهای بتنی طرفین گالری تا تراز بالایی گالری ادامه داده شد و روی سقف گالری نیز با بتن پوشانده شد. اجرای دیواره بتنی در جناح چپ تونل و بتن‌ریزی در طرفین گالری، موجب شد تا وضعیت ناپایدار سنگ و خطر ریزش ناگهانی کنترل شود. در نتیجه پرتال با حداکثر ضریب ایمنی برای گام‌های نهایی حفاری تونل آماده و تحکیم گردید. نقشه سازه‌ای فونداسیون، دیوارها و دیگر اجزای گالری خروجی تونل در شکل ۱۸ ارائه شده است.

همزمان با اجرا و تکمیل گالری خروجی، حفاری در داخل تونل نیز با پیکورکاری در حال انجام بود. گام‌های حفاری و تحکیمات در داخل تونل نیز با حداکثر تمهیدات و ضریب ایمنی در حال انجام بود. به نحوی که هر گام پیشروی حداکثر ۷۵ سانتی متر و نصب قاب نیز در فواصل ۵۰ سانتی متری صورت گرفت.

سرانجام پس از اتخاذ روش‌های مختلف اجرایی و تمهیدات ویژه‌ای که شرح داده شد (شکل ۱۹)، در روزهای پایانی تیرماه ۱۴۰۳ عملیات حفاری تونل در آخرین گام با پیکورکاری (به وسیله بیل مکانیکی) به اتمام رسید.



شکل ۱۸- نقشه سازه‌ای اجزای گالری خروجی تونل دالوکش.

شکل ۱۹- مراحل کارهای اجرایی و بتن‌ریزی در خروجی تونل دالوکش.

۴- نتیجه گیری

تجارب این تونل، ضرورت توجه بیشتر به چند نکته اجرایی را یادآور می‌شود که این نکات می‌تواند جهت انتقال تجربه در زمینه تونل‌سازی مفید باشد:

• ضرورت تصمیم گیری و اقدام فوری در مواجهه با مخاطرات و ریزشهای رخ داده در حین اجرا: مشابه تجارب ریزش‌های رخ داده در حد فاصل کیلومتراژ ۷+۸۵۵ الی ۷+۹۲۰، که با تصمیم‌گیری و علاج‌بخشی سریع از توسعه ریزش‌ها جلوگیری شد.

• پایش روزانه، رفتارنگاری و طبقه‌بندی امتیازات ژئومکانیکی توده‌سنگ جهت اجرای تحکیمات اولیه: در این تونل به این امر توجه ویژه‌ای شده است. این فرآیند طی برداشت‌های مشترک زمین‌شناسان واحد نظارت و پیمانکار، همزمان با عملیات حفاری جهت تعیین نوع تحکیمات اولیه صورت گرفته است.

• بهره گیری از پرسنل مجرب و متخصص در عملیات حفاری و تحکیمات: با توجه به صعب‌العبور بودن و فاصله این سایت از اولین نقطه شهری، کمبود نیروی متخصص از محدودیتها و دشواری‌های خاص این پروژه بوده است.

• عدم ایجاد تغییر در توپوگرافی زمین طبیعی در محدوده اجرای پرتال تونل‌ها: در این تونل اگرچه تیم اجرایی قصد آتشکاری و سبک‌سازی توده سنگ در محدوده پرتال خروجی را داشتند. اما قضاوت مهندسی و برآورد مخاطرات احتمالی نشان داد که نباید حالت طبیعی سنگ (که طی هزاران سال در طبیعت به پایداری رسیده است) را با اعمال تغییرات مستعد ریزش کرد. تجربه اجرایی مؤلفین این مقاله در تونلهای متعدد هم نشان می‌دهد که در سایتهای تونلسازی می‌بایست در محدوده پرتال ورودی و خروجی تا حد امکان از تغییر در حالت زمین طبیعی پرهیز کرد. بلکه بالعکس می‌بایست گالری و دیگر سازه‌های مورد نیاز را متناسب با سطح زمین طبیعی، جانمایی و طراحی کرد.

• وجود برنامه زمان‌بندی کلی و تفصیلی قبل از شروع مراحل اجرایی: تجربه تأخیرات عملیات اجرایی این تونل نشان داد که در هر پروژه تونلی، می‌بایست همزمان با اجرای پرتال ورودی، پرتال خروجی نیز آماده سازی گردد. گالری و سازه‌های مورد نیاز در پرتال خروجی می‌بایست از چند ماه قبل‌تر آماده گردد تا در مراحل پایانی حفاری تونل، از تأخیرات زمانی جلوگیری گردد.

سپاسگزاری

از آنجایی که محتوای این مقاله در بستر تجربیات فنی و اجرایی پروژه احداث راه اصلی الیگودرز-مسجد سلیمان شکل گرفته است؛ لذا مؤلفین بر خود لازم می‌دانند که از مهندسین و پرسنل اجرایی در این پروژه تشکر نمایند. در این میان از آقایان مهندس حسین‌زاده، موسوی، گلپایگانی، میرزایی، دریاب و مهرابی به دلیل زحماتشان (در روند اجرای تونل دالوکش و دیگر سازه‌های پروژه راه الیگودرز-مسجد سلیمان)، به طور ویژه قدردانی می‌گردد.

مراجع

Aghaie, S. and Zolfegharifar, S.Y , (2024)- Investigating the risk factors affecting the safety of tunnel constructions. Civil and Project Journal (CPJ), 6(2), 37-47. (In Persian).

Aganbati, A., (2005). Geology of Iran, publications of the Organization of Geology and Mineral Exploration of the country, first edition. 586 pages, (In Persian).

Bieniawski ZT. (1976). Rock mass classification in rock engineering. In: Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg.1: 97–106.

Bieniawski, Z. T. (1989).Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. Wiley.

Cao, J., Zhao, R., Hu, L., Liang, Q. and Tang, Z. (2022). Application of Internet of things based on wireless sensor in tunnel construction monitoring. Journal of Sensors, Article ID 5302754, 8 pages.

Hoek, E., Brown, E.T., 1980. Underground Excavation in Rock Institution of Mining and Metallurgy, London.

Hoek E and Brown E.T. (1988). "The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update". Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. (ed. J.H. Curran), pp. 31-38. Toronto: Civil Engineering Dept., University of Toronto.

Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., Corkum, B., 2002. Hoek–Brown failure criterion –2002 edition. In: Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and 17th Tunnelling Association of Canada Conference, Toronto, pp. 267–273.

Joudaki, V. and Ajalloeian, R. (2015). The Role of Geological Conditions and Petrology of Formations on Excavation Hazards (Case Study of Ghomroud Tunnel), Journal of GEOSCIENCES;25 (97): 151-162. (In Persian).

Joudaki, V, Koohiyan-Afzal, F, Aalianvari, A, Ajalloeian, R. and Sohrabi-Bidar, A. (2017). Study of the Surface Dissolution Forms and Development of Groundwater in the part 4 of Ghomroud Tunnel Site. Journal of GEOSCIENCES; 26(103): 29 - 40. (In Persian).

Joudaki, V, Ajalloeian, R. and Yazdkhasti, N. (2018.a.) Comparison results of Two-dimensional Resistivity Inversion with Geological Conditions in the along Excavation of Phases 3 and 4 of Ghomroud Tunnel. Journal of Iranian Engineering Geology Society. 11(1): 49-64. (In Persian).

Joudaki, V. Ajalloeian, R , Mobarghaei, N, Sohrabi-Bidar, A, and Aalianvari, A. (2020.a)- The Status of the Principles of Land Ethics in Monitoring the Eco-Hydrological Effects of Civil Projects. Journal of the Engineering Geology Association of Iran. 12(4):123-143, (In Persian).

Joudaki, V. Hassanpour, J. and Ajalloeian, R , (2019). Relationship of Geosciences and Mechanical Engineering in Increasing the Productivity of Tunnel Boring Machines. Journal of the Engineering Geology Association of Iran.11(4): 1-24, (In Persian).

Joudaki, V., Sohrabi-Bidar, A., Ajalloeian, R., Amini, N. and Dickmann, T. (2018.b). Evaluation of Tunnel Seismic Prediction (TSP) Test Results based on Geological Observations and Analysis of the Parameters of the EPB Hard Rock Machine. Iranian Journal of Engineering Geology, 11(2): 15-31, (In Persian).

Joudaki, V., Ghazifard A. and Haghshenas, E. (2021). Urban Geology effects of Sarpol-e-Zahab on the sensitivities of the implementation of two civil structures. Journal of Disaster Prevention and Management Knowledge (DPMK).11(3): 238 – 254, (In Persian).

Joudaki, V. Hassanpour, J. Ajalloeian, R , and Masih Tehrani. M. (2020.b). The need to localize the knowledge of improving tunnel boring machines in the diverse geological conditions of Iran. Journal of the Iranian Mechanical Engineers Association, , 29(130): 11-24, (In Persian).

Komolvilas, V. Tanapalungkorn, W. Latcharote, P. Likitlersuang, S. (2021). Failure analysis on a heavy rainfall-induced landslide in Huay Khab mountain in Northern Thailand, J. Mt. Sci. 18 (10)2580–2596.

Mahdavi, M. (2020). Assessing the Impact of Underground Cavities on Buildings with Stepped Foundations on Sloping Lands, International Journal of Civil and Environmental Engineering, (7)14,234-238.

Mahdavi, M. (2020). Assessing the Effect of Underground Tunnel Diameter on Structure-Foundation-Soil Performance under the Kobe Earthquake, International Journal of Civil and Environmental Engineering 14 (7), 229-233.

Ng, C.L. Khoo, C.M. and Abdul Rahman, N.A. (2024). Geotechnical risks management associated with a tunnel launch in complex geological conditions. ITA-AITES World Tunnel Congress (Tunnelling for a Better Life). held in Shenzhen, China. , Pages 3623-3631.

Noble, A. (2024). Comparing underground construction risk for urban transportation and hydropower projects – A lender's technical advisor's perspective. ITA-AITES World Tunnel Congress (Tunnelling for a Better Life). held in Shenzhen, China. , Pages 3632-3638.

Ou, L., Chen, Y., Zhang, J. and Ma, C., (2022). Dematel-ISM-based study of the impact of safety factors on urban rail tunnel construction projects. Computational intelligence and neuroscience.

Panet, M. (2023). The Tunnel Behavior at The Face of Excavation, Muir Wood Lecture.

Riella, A. Vendramini, M. Eusebio, A. Soldo, L. (2015). The design geological and geotechnical model (DGGM) for long and deep tunnels. Engineering Geology for Society and Territory. 6:991-994.

Rostami, B. Abdollahi, M , and Hoseyni, S,. (2021)- Lessons learned from construction projects and improvement of their efficiency and effectiveness index, ٤th International Conference and ٥th National Conference on Civil Engineering, Architecture, Art and Urban Design, Tabriz. (In Persian).

Sihombing, O.D.M., Purba, H.H. and Purba, A. (2021). Risk identification in tunnel construction project: A literature review. Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering. 261-268.

Soldo, L. Vendramini, M. Eusebio, A. (2019). Tunnels design and geological studies, Tunn. Undergr. Space Technol. 84, 82–98.

Stocklin, J., (1968). Structural history and tectonics of Iran : a review. American Association Petroleum Geologists, Bulletin., 52 (7): 1229 – 1258.

Stocklin, J., (1977). Structural correlation of the Alpine range between Iran central Asia. Memoire Hors-Serve No.8 dela Societe Geologique de France, 8: 333-353.

Wagner, H. (2024). Risk limiting in urban tunnel contracts. ITA-AITES World Tunnel Congress (Tunnelling for a Better Life). held in Shenzhen, China. , Pages 3668-3672.